Escuela de Astrofísica Extragaláctica

Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia

Agosto 9 al 11 de 2010

Manual de Instalación Software CMB

Carlos Eduardo Cedeño Montaña
Leonardo Castañeda Colorado
Alejandro Guarnizo Trilleras

Índice

1. Introducción **2**

2. Elementos Teóricos **2**
2.1. Elementos de Relatividad General 2
2.2. Métrica de Robertson-Walker y universo en expansión 3

3. Paquetes del Software CMB **5**
3.1. Breve Descripción del Software 5

4. Prerrequsitos Básicos **6**
4.1. Sobre el Package Manager 7

5. Prerrequisitos de los paquetes **7**

6. Instalación del script **8**
6.1. Instalación del script `dependences` 8
6.2. Instalación del script `installer` 9

7. Utilización del Software **12**
7.1. Generando espectros con `CMBFAST` 12
7.2. Pixelizando con `HEALPix` 14
7.3. Visualizando con `SkyViewer` 15

1. Introducción

La Radiación Cósmica de Fondo (o CMB de sus siglas en inglés ***C**osmic **M**icrowave **B**ackground Radiation*) constituye hoy en dia una de las pruebas más fundamentales en la teoría del Big Bang. Predicha por George Gamow en 1948 y descubierta en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson, la radiación cósmica de fondo es una radiación electromagnética con el espectro de un cuerpo negro y una temperatura promedio de 2.725 °K que llena todo el universo. Hasta el momento se han realizado dos misiones espaciales con el fin de determinar el espectro del CMB, el primero fue el proyecto COBE (**CO**smic **B**ackground **E**xplorer - http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/) lanzado en el año de 1989 y el proyecto WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe - http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/) cuyos primeros datos fueron obtenidos en el 2003, ambos proyectos han abierto una gran cantidad de investigaciones, en particular la determinación de los parámetros cosmológicos del modelo estándar. Los datos de estos dos proyectos y herramientas de software relacionadas están disponibles en la red sin ningun costo. En lo que sigue nos centraremos en la instalación y uso del software dedicado al análisis de los datos del CMB y la reproducción de modelos cosmológicos que predigan tales datos.

2. Elementos Teóricos

A continuación mostraremos muy brevemente algunos de los elementos básicos de la Relatividad General y el modelo estándar de la Comsologá moderna, base del estudio de la radiación cósmica de fondo.

2.1. Elementos de Relatividad General

La Teoría de la Relatividad General (TRG) esta basada sobre el postulado de las ecuaciones de campo de Einstein (sin constante cosmológica), las cuales determinan la forma de la métrica g en una variedad $\mathcal{M}$:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}Rg_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta}, \qquad \text{Signatura } (+,-,-,-) \tag{1}$$

siendo $R_{\alpha\beta}$ el tensor de Ricci, R el escalar de curvatura, $T_{\alpha\beta}$ el tensor de energía-momentum, G la constante de gravitación universal y c la velocidad de la luz. El tensor de Ricci se obtiene como contracción del tensor de Riemann dado por:

$$R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta} = \frac{\partial\Gamma^{\alpha}_{\delta\beta}}{\partial x^{\gamma}} - \frac{\partial\Gamma^{\alpha}_{\gamma\beta}}{\partial x^{\delta}} + \Gamma^{\alpha}_{\gamma\sigma}\Gamma^{\sigma}_{\delta\beta} - \Gamma^{\alpha}_{\sigma\delta}\Gamma^{\sigma}_{\gamma\beta}, \tag{2}$$

con $\Gamma^{\alpha}_{\beta\gamma}$ las conexiones (o símbolos de Christoffel):

$$\Gamma^{\alpha}_{\beta\gamma} = \frac{1}{2}g^{\alpha\sigma}\left[\frac{\partial g_{\sigma\beta}}{\partial x^{\gamma}} + \frac{\partial g_{\sigma\gamma}}{\partial x^{\beta}} - \frac{\partial g_{\beta\gamma}}{\partial x^{\sigma}}\right], \tag{3}$$

siendo $g_{\alpha\beta}$ las componentes del tensor métrico en algún sistema de referencia. Así tendremos $R_{\alpha\beta} = R^{\eta}_{\alpha\eta\beta}$ y el escalar de curvatura dado por $R = R^{\alpha\beta}R_{\alpha\beta}$. El tensor de energía-momentum se relaciona con la variación de los campos de materia por la ecuación:

$$T_{\alpha\beta} \equiv -\frac{2}{\sqrt{-g}}\frac{\delta S_M}{\delta g^{\alpha\beta}}. \tag{4}$$

Las ecuaciones de campo de Einstein con constante cosmológica se pueden escribir como:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}Rg_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta}, \tag{5}$$

equivalentemente el término de la constante cosmológica se puede interpretar como una contribución al tensor de energía-momentum, si escribimos tal factor al lado derecho de las ecuaciones de campo. Una condición importante que se le exige al tensor de energía-momentum es que su derivada covariante sea nula:

$$\nabla_{\beta}T^{\alpha\beta} = 0, \tag{6}$$

la cual es denominada como la ecuación de conservación de energía.

2.2. Métrica de Robertson-Walker y universo en expansión

Por otra parte el Modelo Estándar de la Cosmología esta basado en dos principios: La homogeneidad e isotropía del universo. Esos postulados permiten escribir el elemento de línea en un universo máximalmente simétrico por medio de la métrica de Robertson-Walker (en unidades de $c = 1$):

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2\right], \tag{7}$$

siendo $a(t)$ el factor de escala y k un parámetro que nos dice si la geometría del universo es plana ($k = 0$), esférica ($k = 1$) o hiperbólica ($k = -1$).

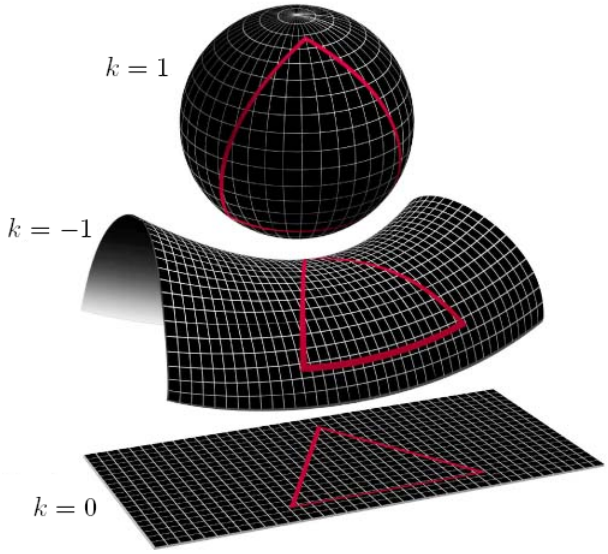


Figura 1. Geometría espacial del universo.

Estos postulados nos llevan a escribir el tensor de energía-momentum en la forma de un fluido perfecto:

$$T^{\mu}_{\nu} = \text{diag}\,(\rho, -p, -p, -p) \tag{8}$$

siendo p la presión del fluido y ρ la densidad de energía. Las ecuaciones de campo de Einstein sin constante cosmológica para la métrica (7) con el tensor de energía-momentum (8) son:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}, \qquad \text{Componente temporal} \tag{9}$$

y

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p), \qquad \text{Componentes espaciales} \tag{10}$$

en donde definimos el parámetro de Hubble como $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$. Para resolver estas ecuaciones es necesario conocer una relación entre la presión p y la densidad de energía ρ. La forma más usual es considerar una ecuación de estado de la forma [2]:

$$p = w\rho, \tag{11}$$

con w un parámetro. Al conjunto de ecuaciones (9) y (10) se les conoce como *ecuaciones de Friedmann-Lemaître*, y junto con la ecuación de estado (11) determinan el modelo cosmológico. Los modelos más trabajados son los de polvo ($w = 0$) y radiación ($w = 1/3$), los cuales dan cuenta de la evolución del universo. Sin embargo, hoy en día sabemos que nuestro universo se expande de forma acelerada. De esta manera surgen los modelos de constante cosmológica, que tratan de explicar esa expansión introduciendo formas exóticas de energía. Para que tengamos un universo en expansión se necesita que $\ddot{a} > 0$, y a partir de la ecuación (10), junto con la ecuación

de estado (11), se llega a que $w < -1/3$. Los modelos con ecuaciones de estado de esta forma se denominan de Quintaesencia. El caso con $w = -1$ se obtiene suponiendo que la densidad es constante, lo que nos lleva a una ecuación de estado de la forma:

$$p = -\rho, \tag{12}$$

es decir, una ecuación de estado con presión negativa. A esta forma de energía que reproduce una presión negativa se le conoce como **energía oscura**. Podemos entonces asociar una densidad, que llamaremos densidad de energía del vacío relacionada con la constante cosmológica por la relación:

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G}, \tag{13}$$

Definimos los parámetros cosmológicos por las siguientes relaciones:

$$\Omega_m = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}, \qquad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}, \qquad \Omega_k = -\frac{k}{a^2H^2}, \tag{14}$$

con lo cual la ecuación primera ecuación de Friedmann se escribe como:[1]

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1, \tag{15}$$

llamada como la regla de suma cósmica. Observaciones con supernovas de tipo Ia (Sn Ia) muestran que los valores actuales de estos parámetros son [1],[2],[3]

$$\Omega_m \approx 0{,}28, \qquad \Omega_\Lambda \approx 0{,}72, \qquad \Omega_k \approx 0. \tag{16}$$

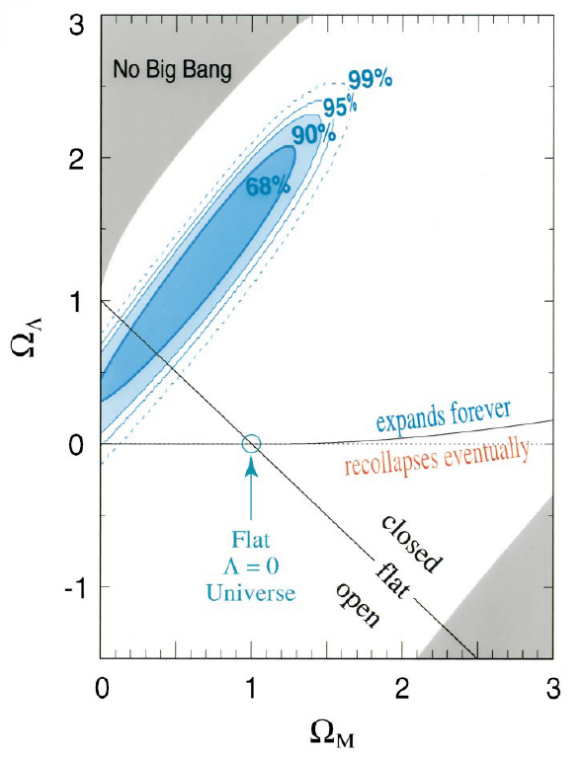


Figura 2. Regiones de coincidencia para los parámetros Ω_Λ y Ω_m (Perlmutter et al, (1999)) [4].

La figura anterior muestra las regiones de coincidencia en un plano de Ω_Λ y Ω_m a partir del cual se pueden estimar las cotas para los anteriores parámetros. Por otro lado, gracias al estudio de la Radiación Cósmica de Fondo (CMB) por medio del proyecto Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), se demuestra que el

[1] El termino Ω_Λ surge de considerar las ecuaciones de campo de Einstein con constante cosmológica, ecuación (5).

contenido actual de materia en el universo esta compuesto en un 72.1 % de energía oscura, un 23.3 % de materia oscura y un restante 4.6 % de materia ordinaria (o mejor llamada bariónica)[2] [5].

3. Paquetes del Software CMB

En la pagina LAMBDA (**L**egacy **A**rchive for **M**icrowave **B**ackground **D**ata **A**nalysis)

http://cmbdata.gsfc.nasa.gov/

se encuentran los paquetes que consituyen el análisis, visualización y modelamiento de los datos del CMB. A continuación mostramos tales programas.

Paquete	**Tamaño** (MB)
cfitsio 3240	2.548
cmbfast 4.5.1	2.932
webcmbfast 4.5.1	0.020
Healpix	28.194
GLESP	0.523
CAMB	0.167
CMBEASY	9.933
CosmoMC	9.140
CosmoNet	17.260
WMAPViewer	Only Online
CMBview	2.376
SkyViewer	10.296
SpiCE	0.152
PICO	0.162
RADPACK	0.400
RECFAST	0.052
MADmap	12.661
IDL Healpix visualizers	0.006
NoiseSim	0.017
mcmcViewer	0.105
Process Monitor	0.007
Evolve	0.012
CMB Simulations	∞

3.1. Breve Descripción del Software

A continuación una breve descripción de los paquetes, para algunos se encuentran paginas con información detallada.

- **cfifsio**: Conjunto de librerias de `C` y `Fortran` para leer y escribir archivos de tipo FITS (**F**lexible **I**mage **T**ransport **S**ystem)
- **CMBFAST**: Herramienta que genera espectros de la radiación cósmica dados unos parámetros cosmológicos. `CMBFAST` `CMBFAST Online`
- **Healpix**: (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization of a sphere) Esquema de pixelización del cielo sobre una esfera. `Healpix`

[2] Obtenidos también de http://map.gsfc.nasa.gov/

- **GLESP**: Pixelización del cielo usando Gauss-Legendre. GLESP
- **CAMB**: Codigo para las anisotropías de la radiación cósmica de fondo que calcula espectros para un conjunto de parámetros cosmológicos. CAMB CAMB Online
- **CMBEASY**: Rutinas en C++ basadas en espectros de CMBfast para calcular la evolución de fluctuaciones de densidad en el universo. CMBEASY
- **CosmoMC**: (Cosmological MonteCarlo) Una rutina de cadenas de Markov y método de Monte Carlo en Fortran 90 para explorar parámetros cosmológicos. CosmoMC
- **CosmoNET**: (Cosmological Neural Networks) Estimación de parámetros cosmológicos usando redes neurales.
- **CMBview**: (MacOsX viewer) Es un visor basado en OpenGL para la representación de datos del CMB en formato Healpix. CMBview
- **SkyViewer**: (Unix) Es un visor basado en OpenGL para la representación de datos del CMB en formato Healpix. SkyViewer
- **WMAPViewer**: A LAMBDA-developed web-based CMB map viewing tool. WMAPViewer
- **RecFast**: Un codigo en Fortran 90 para calcular la historia de recombinación del universo. RecFast
- **SpICE**: Spatially Inhomogenous Correlation Estimator.
- **MADMAP**: Microwave Anisotropy Data Computational Analysis Package.
- **mcmcViewer**: Un visor 3D en OpenGL para cadenas de Markov.
- **NoiseSim**: Generador de mapas para ruido simulado en WMAP.
- **Evolve**: Este paquete traza la evolución del campo escalar durante inflación.
- **PICO**: Parameter for Impatient Cosmologist, Calcula espectros de potencias del CMB, funciones de transferencia y verosimiltud en WMAP5.
- **CMB Simulations**: Simulaciones en alta resolución para la temperatura de las microondas incluyendo anisotroías secundarias.

4. Prerrequsitios Básicos

Los programas básicos que deben estar instalados en el computador son

Python
GTK
Java
QT
QT4
OpenGL
C
C++
Fortran 77
Fortan 90
Fortran 95
ImageMagick

Para obtener estos programas se debe utilizar el software para instalar o desintalar programas (o *Package Manager*) del sistema (solo en sistemas Unix: Solaris, Linux, MacOsX). En el caso de Windows se deben compilar las librerias solo hasta después de tener los compiladores necesarios.

4.1. Sobre el Package Manager

Todas las distribuciones de Linux poseen un Package Manager. Por ejemplo Ubuntu y Debian tienen Synaptic, OpenSuse tiene Yast y para MacOsX existen dos formas para instalar los paquetes:

1. Fink (Advanced Packaging Tool -As Debian-)
2. MacPorts (Package Management System)

Synaptic	YaST	Synaptic	Fink, MacPorts

5. Prerrequisitos de los paquetes

A continuación presentamos los prerrequisitos para cada paquete.

- **cfifsio**: C, Fortran 77 y Fortran 90.
- **CMBFAST**: Fortran 77, gnuplot, MPI.
- **GLESP**: FFTW (Fast Fourier Transform in the West) Libreria en `C` para realizar transformada de Fourier en una o mas dimensiones, C.
- **Healpix**: Fortran 90, C, C++, Java, IDL (o GDL), gv, Magick.
- **CAMB**: Healpix, Fortran 90, cfitsio, MPI.
- **CMBEASY**: Cmake, C++, C, MPI, gsl (Gnu Scientific Library).
- **CosmoMC**: Fortran 90, Fortran 77, MPI, cfitsio, gsl.
- **CosmoNET**: Fortran 90, Fortran 77, MPI, cfitsio, gsl.
- **CMBview**: (Binary Version Nothing) Código fuente para la instalación de unix en mac: hpic,cfitsio
- **SkyViewer**: QT4.4.3, OpenGL, libQGLviewer, Healpix, C++, qmake.
- **WMAPviewer**: Ninguno.
- **RecFast**: Fortran 77 y C.
- **SpICE**: Fortran 90, Healpix, cfitsio
- **RADPACK**: Without Information.
- **MADMAP**: MPI, C, FFTW.

- **mcmcViewer**: qmake, C, C++, OpenGL, LibQGLviewer.
- **NoiseSim**: Fortran 90, cfitsio, Healpix, Lapack (Linear Algebra Package), Blas (Basic Linear Algebra)
- **Evolve**: C++
- **PICO**: Fortran 90, Blas, Lapack
- **CMB Simulations**: Todo el software instalado.

6. Instalación del script

Para la instalación del software CMB se han creados dos scripts que descargan e instalan tanto las dependencias como cada uno de los paquetes. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Cree una carpeta con el nombre `CMB`.

```
mkdir CMB
```

2. Descargue el archivo `source.tgz` y descomprima su contenido con la opción

```
tar -zxvf source.tgz
```

este proceso crea una carpeta con el nombre `source`. Mueva tal carpeta al directorio `CMB` y verifique que el contenido sea el siguiente

```
user@linux: ~/CMB/source> ls
CAMB.tar.gz               glesp.tar.gz                    libLASi-1.1.0.tar.gz       plplot-5.9.6.tar.gz
cfitsio3250.tar.gz        gsm.tar.gz                      libQGLViewer-2.3.6.tar.gz  recfast.for
cgmlib-0.9.5.Beta.tar.gz  hdf-4.2.5-linux-x86_64.tar.gz   lista.txt                  skyviewer-1.0.0.tar.gz
cmbfast.tar. gz           hdf-4.2.5.tar.gz                noisesim_p3v1.tar.gz       szip-2.1.tar.gz
gdj-0.9rc4.tar.gz         Healpix_2.15a_2010jun18.tar.gz  pgplot.2.tar.gz
```

3. Descargue el archivo `installer.tgz` y descomprimalo con el comando

```
tar -zxvf installer.tgz
```

verifique que el contenido de la carpeta `installer` sea el siguiente

```
user@linux: ~/installer> ls
confnew.repo       confold.repo      dependences        installer        patches        scripts
```

Vamos ahora a ver detalladamente la instalación de los scripts `dependences` e `installer`.

6.1. Instalación del script `dependences`

El script `dependences` descarga e instala los respositorios y dependencias necesarias para la instalación del software CMB. El presente script esta diseñado para la instalación en el sistema **Open Suse**, en los otros sistemas operativos se deben hacer cambios para los repositorios. Recomendamos hacer la instalación con una conexión a internet fuera de la Universidad, pues esta impide en algunos casos la descarga de algunos repositorios. Para la instalación del script se procede como sigue:

1. Ejecute el script `dependences` con la instrucción

```
sudo ./dependences
```

ingrese la contraseña de super usuario.

2. El script entonces descarga los repositorios necesarios e instala las librerias que son base de los programas del software CMB

3. Una vez instalados los repositorios al final del proceso debe aparecer el siguiente mensaje

```
Todos los repositorios han sido actualizados
```

6.2. Instalación del script `installer`

El script `installer` es estándar para todos los sistemas operativos, siempre y cuando las dependencias y repositorios de los prerrequisitos hayan sido debidamente instalados. Para correr el script se llevan a cabo los siguientes pasos

1. Dentro de la carpeta installer ejecute el script `installer` con la opción

```
./installer
```

La descarga e instalación de los paquetes comenzara. Durante una parte del proceso apareceran unas graficas demostrativas del paquete `pgplot`, en esa ventana orpima enter hasta que todas las demostraciones pasen y la instalación continue su curso. Al finalizar el proceso vuelva a ejecutar el installer, si todos los pasos estuvieron hechos correctamente el resultado de esa nueva ejecución es la siguiente:

```
CMB Installer

Copyright (C) 2010 Carlos Eduardo Cedeño Montaña - macvyrus79@yahoo.com

[ Checking your Operative System ]

Distribution     .....   SUSE
Plattform        .....   Linux
Architecture     .....   x86_64

[ Checking some packages installed ]

cc compiler        ........      found. Version 4.4
gcc compiler       ........      found. Version 4.4
c++ compiler       ........      found. Version 4.4
g++ compiler       ........      found. Version 4.4
gfortran compiler  ........      found. Version 4.4.1
g77 compiler       ........      found. Version 3.3.3
python interpreter ........      found. Version 2.6.2
[ Checking if in your sistem exist the CMB distribution ]

In your system CMB tree already exists in
/home/user/CMB

 Verifing all structure

/home/user/CMB/source  found
/home/user/CMB/cfitsio  found
/home/user/CMB/cmbfast  found
/home/user/CMB/recfast  found
/home/user/CMB/glesp  found
/home/user/CMB/pgplot  found
/home/user/CMB/liblasi  found
/home/user/CMB/plplot  found
```

```
/home/user/CMB/qglviewer  found
/home/user/CMB/gdl  found
/home/user/CMB/healpix  found
/home/user/CMB/noisesym  found
/home/user/CMB/spice  found
/home/user/CMB/gsm  found
/home/user/CMB/skyviewer  found

[ Checking the sources and downloading the packages in /home/user/CMB/source ]

cfitsio3250.tar.gz found
cmbfast.tar.gz found
recfast.for found
glesp2.tar.gz found
pgplot5.2.tar.gz found
plplot-5.9.6.tar.gz found
libQGLViewer-2.3.6.tar.gz found
gdl-0.9rc4.tar.gz found
Healpix_2.15a_2010Jun18.tar.gz found
skyviewer-1.0.0.tar.gz  found

[ Compiling and Installing all packages ]

Testing if cfitsio are compiled in /home/user/CMB/cfitsio
cfitsio are compiling and installed

Testing if recfast are compiled in /home/user/CMB/recfast
Recfast are compiled

Testing if pgplot are compiled and installed in /home/user/CMB/pgplot
Pgplot are compiled and installed

Testing if liblasi are compiled and installed in /home/user/CMB/liblasi
liblasi are installed

Testing if liblasi is working

liblasi test passed

Testing if plplt are compiled and installed in /home/user/CMB/plplot
Plplot are compilled and installed

Testing if plplt are compiled and installed in /home/user/CMB/qglviewer
libQGLViewer are installed

Testing if cmbfast are compiled in /home/v/CMB/cmbfast
cmbfast are compiling and installed

Testing if glesp are compiled and installed in /home/user/CMB/glesp
Glesp2 are compiled and installed

Testing if Healpix are compiled and installed in /home/user/CMB/healpix
Healpix are installed

Testing if skyviewer are compiled and installed in /home/user/CMB/skyviewer
Skyviewer are installed

Testing if the noise simulator are compiled and installed in /home/user/CMB/noisesym
noisesym aren't compiled. Now compilling and installing

Unpacking
Compiling the source
```

```
patching file Makefile
/usr/lib64/gcc/x86_64-suse-linux/4.4/../../../../x86_64-suse-linux/bin/ld: cannot find -lf2c
collect2: ld returned 1 exit status
make: *** [makesvd] Error 1
Testing if gsm are compiled and installed in /home/user/CMB/gsm
gsm are installed

Testing if camb are compiled and installed in /home/user/CMB/camb
camb installed

[ Finish the installation of all packages ]

Now, copy the following lines in /home/user/.bashrc
PGPLOT_DIR=/home/user/CMB/pgplot; export PGPLOT_DIR
LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:/home/user/CMB/pgplot; export LD_LIBRARY_PATH
LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:/home/user/CMB/cfitsio/lib; export LD_LIBRARY_PATH
LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:/home/user/CMB/pgplot/lib; export LD_LIBRARY_PATH
```

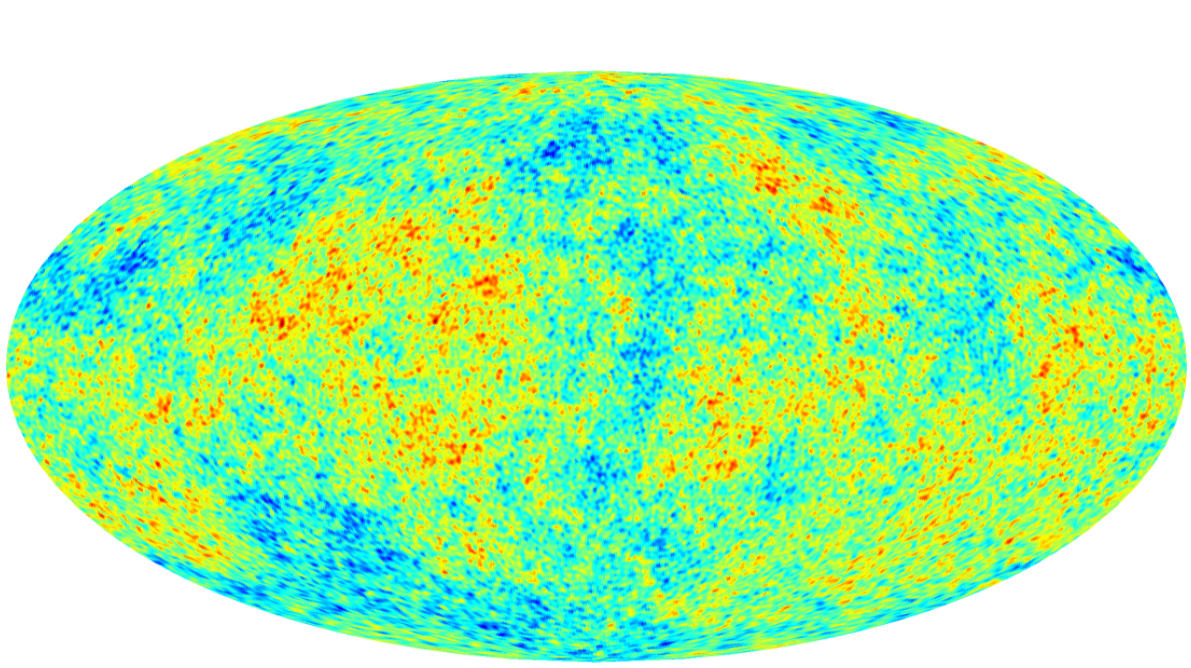
2. En una nueva terminal abra el archivo `.bashrc` ubicado en el directorio `/home/user` con un editor de texto y pegue al final del mismo las líneas que aperecen al final de la compilación del `installer`. Guarde y cierre el archivo. Este proceso se realiza para habilitar `pgplot`.
3. Verifique que en la carpeta CMB se hayan creado los siguientes directorios:

```
user@linux: ~/CMB
user@linux: ~/CMB> ls
camb      cmbfast   gdl-0.9rc4     gsm       liblasi     pgplot     gqlviewer    skyviewer    spice
cfitsio   gdl       glesp          healpix   noisesym    plplot     recfast      source
```

Para verificar que la instalación se haya llevado a cabo correctamente ingrese a la carpeta `skyviewer` ubicada en el directorio `CMB` y ejecute la siguiente línea

```
user@linux: ~/CMB/skyviewer> ./skyviewer ~/CMB/healpix/test/map.fits &
```

Esto desplegara el visor `skyviewer` con el siguiente mapa de temperatura:



7. Utilización del Software

Ahora veremos como se utiliza el software una vez instalado. El proceso para obtener un mapa de temperatura es como sigue:

I. Generar un espectro angular del CMB a partir de unos parámetros cosmológicos usando CMBFAST.

II. Convertir los archivos generados con CMBFAST usando la herramienta Healpix para generar los mapas de temperatura.

III. Visualizar los mapas con la herramienta Skyviewer.

Dscribiremos ahora cada paso en detalle.

7.1. Generando espectros con `CMBFAST`

El código CMBFAST fue desarrollado por Uroš Seljak y Matias Zaldarriaga para calcular el espectro lineal de anisotropías en la radiación cósmica basado en la integración de fuentes sobre el cono de luz pasado de un fotón. La anisotropía en la temperatura es escrita como una integral temporal sobre el producto de los terminos geométricos de las fuentes. La formulación esta basada en encontrar las anisotropías en la temperatura resolviendo para esto la ecuación de Boltzmann usando una expansión de Legendre para la función de distribución de un foton [6] .

La anisotropía en la temperatura en una posición $\vec{x}$ y una dirección $\vec{n}$ se denota por $\Delta_T(\vec{x},\vec{n})$, la cual puede ser expandida en terminos de modos de Fourier como $\Delta_T(\vec{k},\vec{n})$. Si las perturbaciones son axialmente simétricas sobre el vector $\vec{k}$ se puede escribir la anisotropía como una expansión de Legendre en el ángulo $\mu = \vec{k}\cdot\vec{n}/k$ en la forma

$$\Delta_T(\vec{k},\vec{n}) = \sum_\ell (2\ell+1)(-i)^\ell \Delta_{T\ell} P_\ell(\mu) \tag{17}$$

en donde $P_\ell(\mu)$ con los polinomios de Legendre de orden ℓ y $\Delta_{T\ell}$ el momento multipolar asociado. Entonces la evolución de esta anisotropía es gobernada por la ecuación de Boltzmann, que se puede en dividir en sistema de ecuaciones para la evolución de las perturbaciones escalares y otro para las perturbaciones tensoriales, las cuales nos pueden dar las anisotropías en la temperatura y su polarización en sus componentes escalares y tensoriales. Por otro lado, el contenido de Bariones y materia oscura se aproximan como fluidos y su evolución esta dada por la ley de conservación del tensor energía-momentum, las ecuaciones diferenciales entonces dependen de los potenciales de la perturbación escalar y la perturbación tensorial.

Para obtener la anisotropía en la temperatura para un modo k dado se debe empezar en un tiempo temprano en la epoca de dominio de radiación con unas condicioens iniciales apropiadas (e.g. isentrópicas o de isocurvatura) y hacer evolucionar las ecuaciones hasta el presente. El espectro de las anisotropías se obtiene entonces por una integración sobre el espectro de potencias inicial de la perturbación métrica $P_\psi(k)$:

$$C_\ell^{(S)} = (4\pi)^2 \int dk\, k^2 P_\psi(k) |\Delta_{T\ell}^{(S)}(k,\tau=\tau_0)|^2 \tag{18}$$

El método de Seljak y Zaldarriaga consiste entonces en integrar las ecuaciones diferenciales para las asnisotropías sobre el cono de luz pasado de un fotón. Con esto entonces se calcula el C_ℓ en función de ℓ para un conjunto de parámetros cosmológicos dado.

Vamos entonces ahora a correr el código CMBFAST usando para esto los parámetros que por defecto trae. Los pasos son los siguientes

1. Ingrese a la carpeta `/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe` verifique que en esta acrpeta se encuntre los siguientes archivos:

```
user@linux: ~/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe> ls
cmb   jlens  jlgen LICENSE  ujlgen
```

2. Ahora debemos generar los archivos de entrada `jlens.dat` (Funciones de Bessel para el cálculo de lensamiento), `jlgen.dat` (Funcioens de Bessel en un universo plano) y `ujlgen.dat` (Funciones de Bessel en un universo abierto). Para esto corremos los archivos con las instrucciones `./jlens`, `./jlgen` y `./ujlgen` respectivamente:

```
user@linux-m82b:~/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe> ./jlens
 Enter lmax (1500)
1500
 Enter output file (jlens.dat)
jlens.dat
user@linux-m82b:~/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe> ./jlgen
 Maximum value of l, keta: (1500, 3000)
1500,3000
 Enter output filename
jlgen.dat
user@linux-m82b:~/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe> ./ujlgen
 Maximum value of l,keta: (1500,3000)
1500,3000
 Enter output filename
ujlgen.dat
user@linux-m82b:~/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe> ls
cmb  jlens  jlens.dat  jlgen  jlgen.dat  LICENSE  ujlgen  ujlgen.dat
```

3. Una vez creados estos archivos compile el código CMBFAST con la opción `./cmb`:

```
user@linux-m82b:~/CMB/cmbfast/cmbfast_cobe> ./cmb
 CMB (0), transfer functions (1) or both (2):
 If you want the lensed Cls you will need (2)
0
 Value of lmax, ketamax (e.g. 1500 3000)
 Remember to be consistent with the file
 in the flat case.
1500 3000
 constant equation of state with dark energy
 perturbations (1), without (3), table with a,w
 with perturbations (2) or without (4)
1
 Enter wdyn (e.g -1)
-1
 Enter (1) if you want to include                          the 5th dimension
  Enter(0) if you want the                         usual FRW space-time
0
 Enter Omega_b, Omega_c, Omega_de,Omega_nu (.05 .3 0.65 0)
.05 .3 0.65 0
 Enter (1) if you want to                            include the 5th dimension
  Enter(0) if you want the                                 usual FRW space-time
0
 Enter H0, Tcmb, Y_He, N_nu(massless), N_nu, g*(massive)
```

```
 (e.g. 65 2.726 0.24 3.04 0 10.75)
65 2.726 0.24 3.04 0 10.75
 Enter 0 for Peebles recombination
 or 1 for recfast
1
 Calling recfast
 recfast succesfully completed
 Enter 0 for no reionization
 Enter 1 for specified optical depth to lss(xe=1)
 Enter 2 for specified redshift and xe
0
 Enter 0 for scalar alone,
 1 for tensor+scalar 2 for tensors alone
 3 for scalar (k<k*) and 4 for scalar (k>k*)
1
 number and values of scal. spectral index n,
 and its running alpha_n (1,1,0)
1,1,0
 Tensor spectral index given by nt=ns-1 (0) or different (1)
0
 ratio of tensor to                                          scalar quadrupole given by
 7(1-n_S) (0) or different (1):
0
 Enter output filename for SCALAR cl
prueba1.fcl
 Enter output filename for TENSOR cl
prueba1.tcl
 Enter FITS file name
salida1.fits
 Enter initial conditions
 1= Isentropic (adiabatic)
 2= Isocurvature CDM
 3= Isocurvature baryon
 4= Isocurvature seed conditions
1
 Enter input filename for jl
jlgen.dat
 Q_rms-ps =   0.7660E+02 micro K
```

Así entonces generamos 3 archivos: los archivos `prueba1.fcl` y `prueba1.tcl` que nos dan los modos escalares y tensoriales respectivamente, y el archivo `salida1.fits` que es el archivo FITS de salida. Se puede comprobar la correcta utilización del código usando para esto la herramienta online del software CMBFAST disponible en:

http://cmbdata.gsfc.nasa.gov/toolbox/tb_cmbfast_form.cfm

recomendamos usar esta interfaz web para comparar los datos.

7.2. Pixelizando con HEALPix

Healpix (**H**ierarchical **E**qual **A**rea iso**L**atitude **Pix**elization on a sphere) como su nombre lo indica, este programa produce una subdivisión de una superficie esférica en la cual cada pixel cubre la misma área que cualquier

otro pixel. La figura muestra la partición de la esfera en resolucioens progresivamente más altas. La esfera verde representa la resolución mas baja posible con una base de 12 pixeles de igual tamaño, la esfera amarilla con una partición de 48, la roja con 192 pixels, y la esfera azul con 768 pixeles.

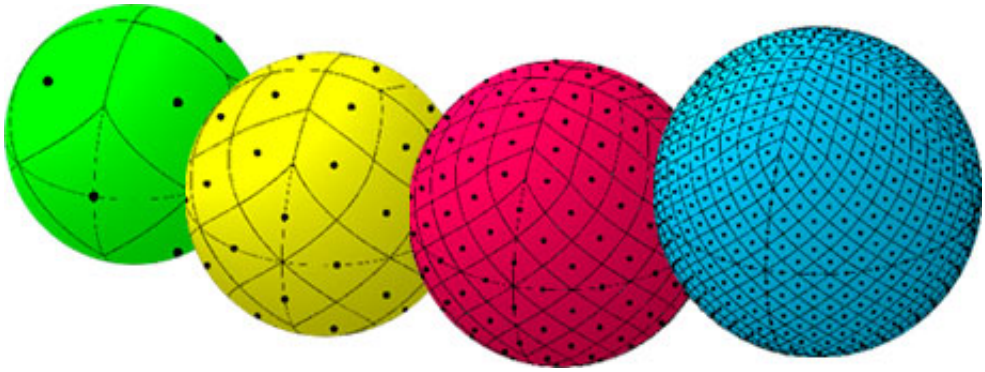


Figura 3. Partición de la esfera en diferentes resoluciones.

7.3. Visualizando con `SkyViewer`

SkyViewer es un programa basado en OpenGL para visualizar mapas generados por HEALPix. Los mapas se pueden ver como una esfera 3D o como una proyección Mollweide, en cualquier caso se pueden hacer movimiento horizontales y zoom con rotacioens sobre la esfera 3D. Algunas características adicionales son

- Rotación, zoom y movimiento horizontal del mapa en tiempo real
- Elección de visaulización de esfera en 3D o proyección Mollweide en 2D
- Alineación de la textura del pixel con las fornteras del pixel en Healpix
- Selección del pixel e información del mismo.
- Posibilidad de ajuste de color a escala de grises
- Ver temperatura, polarización y dirección de los vectores de polarización
- Guardar las imagenes del mapa en formato .jpg, .png, .eps, .bmp y .fig.

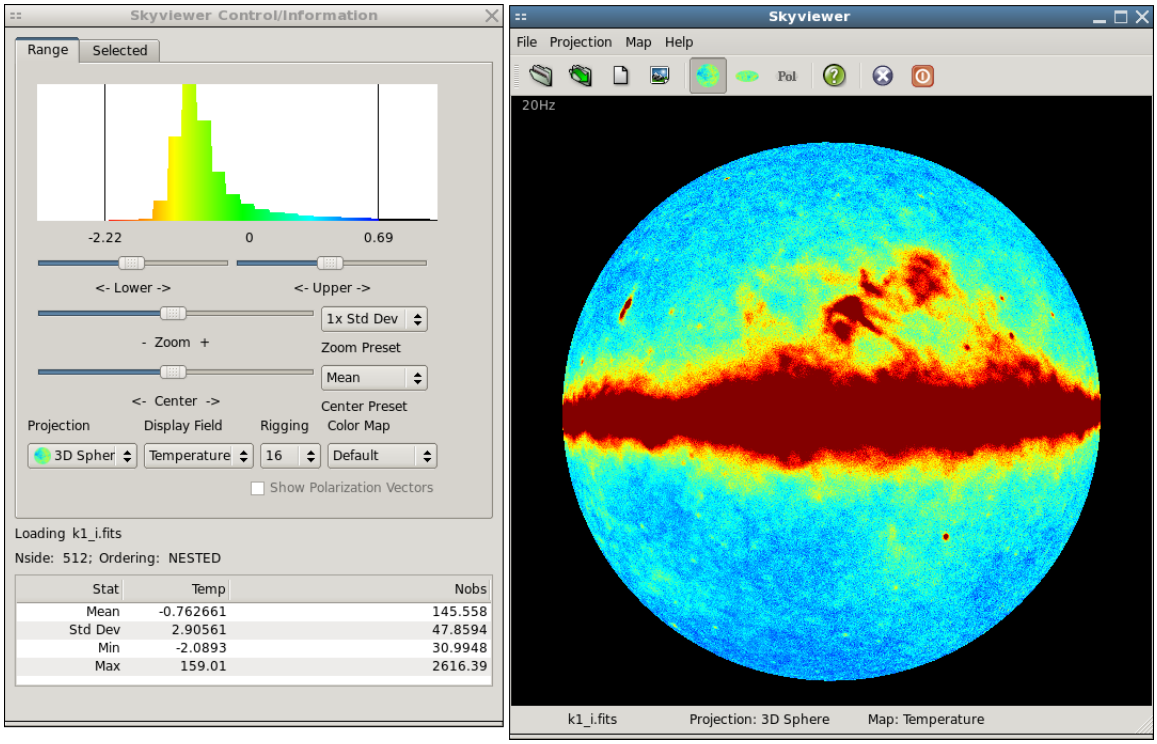


Figura 4. Vista de la ventana de Skyviewer.

Para usar Skyviewer entramos a la carpeta `/CMB/skyviewer` y lo abrimos con

`./skyviewer imagen`

en donde `imagen` corresponde a la ruta del archivo que deseamos abir y su nombre con extensión .FITS. Dentro de la carpeta Healpix hay otra llamada test en donde podemos realizar las pruebas del funcionamiento de Skyviewer. Con la instrucción

`user@linux-m82b:./skyviewer ~/CMB/healpix/test/map.fits &`

obtenemos la siguiente imagen en el display de Skyviewer:

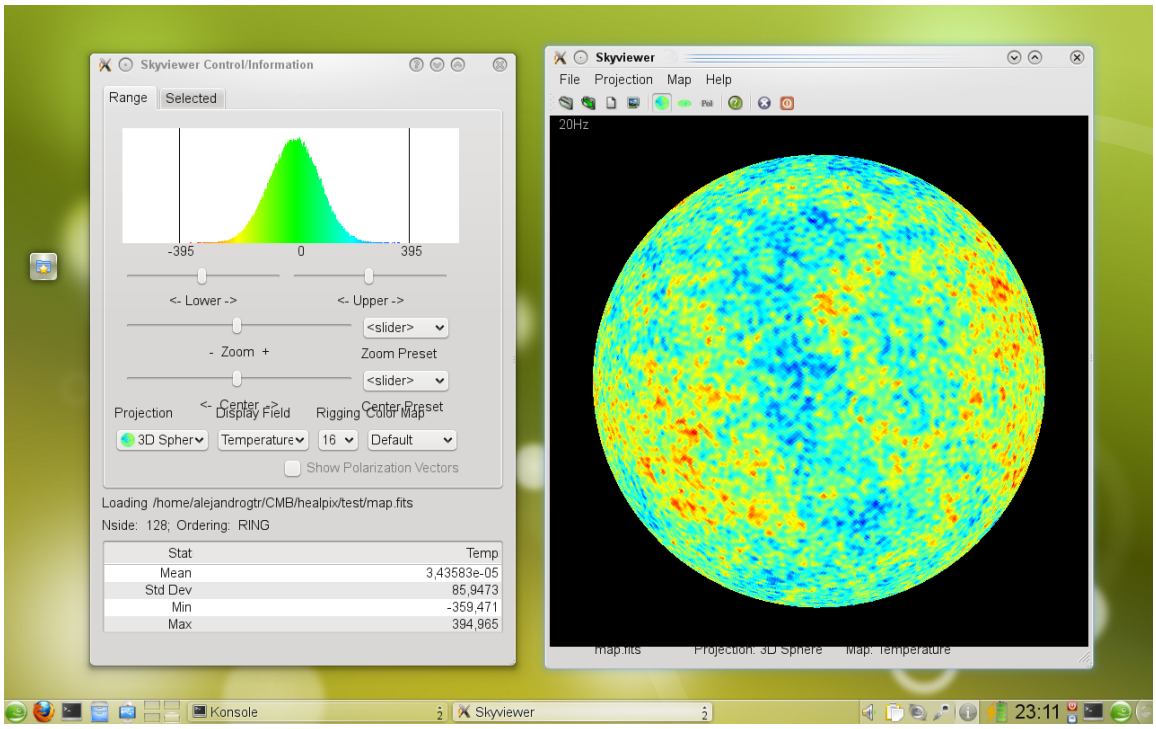


Figura 5. Vista del archivo `map.fits` en la proyección de una esfera 3D.

o en el modo de proyección Mollweide:

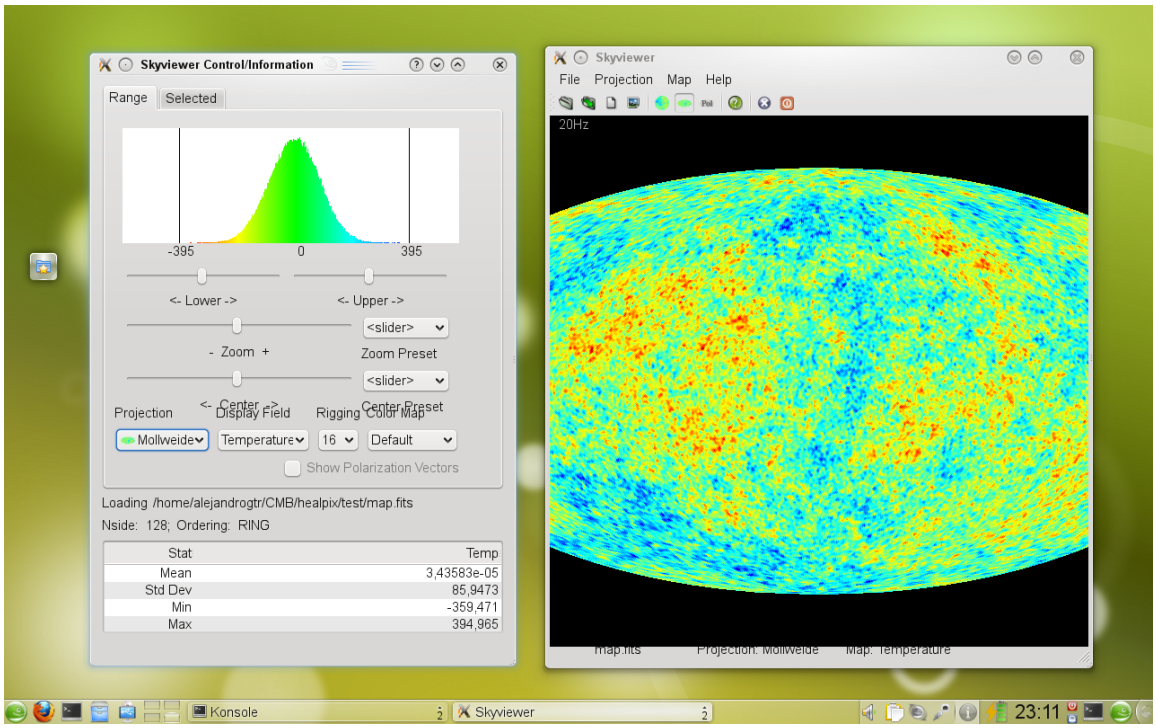
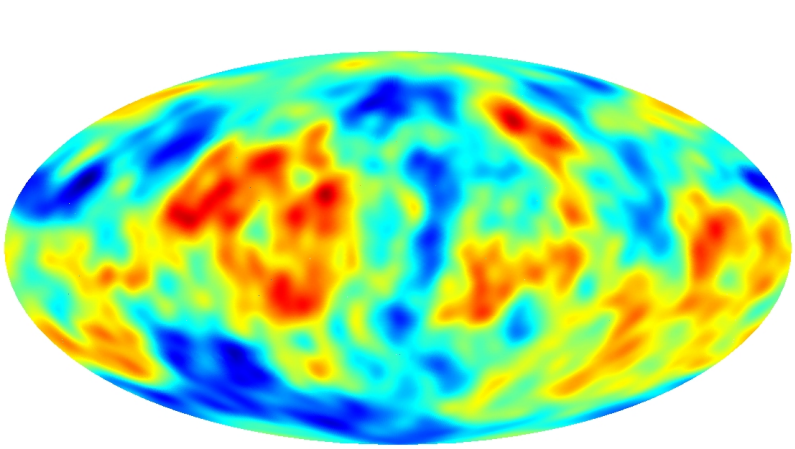


Figura 6. Vista del archivo `map.fits` en la proyección Mollweide 2D.

Estos son ejemplos de otros mapas de temperatura en donde podemos ver diferencias en el proceso de pixelización:



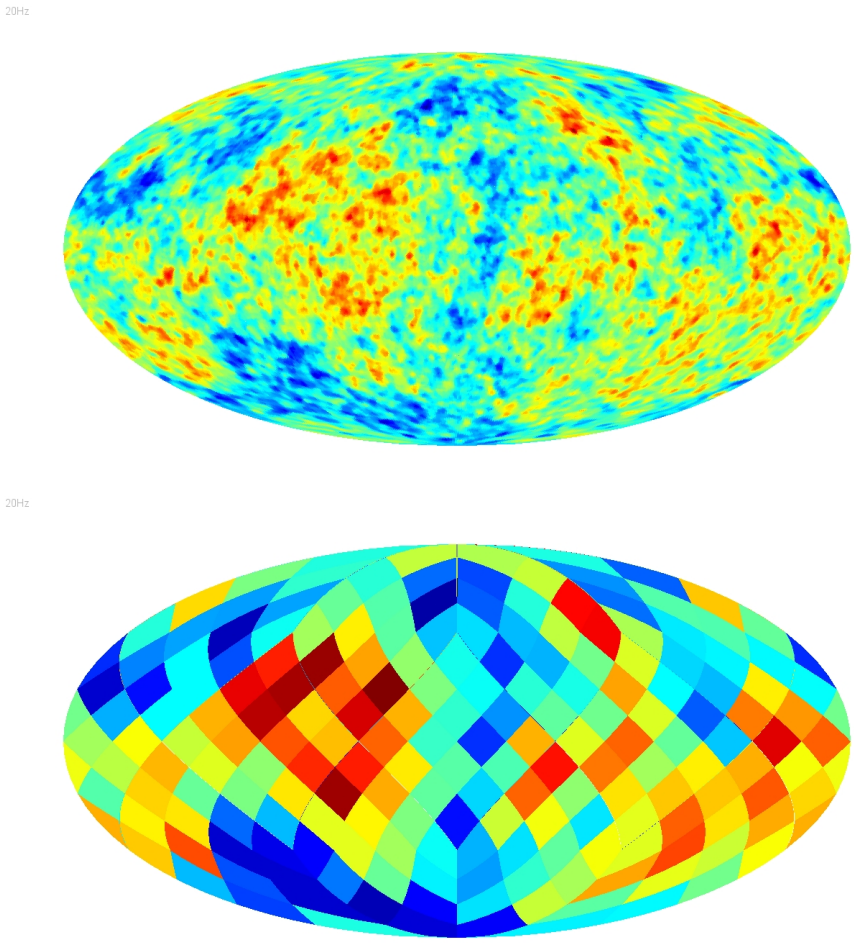


Figura 7. Diferentes esquemas de pixelización.

Finalmente podemos obtener mapas de temperatura con alta definición de la pagina:

http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr4/maps_sim_forered_da_r9_i_1yr_get.cfm

los cuales son datos reales del WMAP. Por ejemplo para el archivo `wmap_sim_forered_imap_r9_yr7_W4_v4.fits` tendremos:

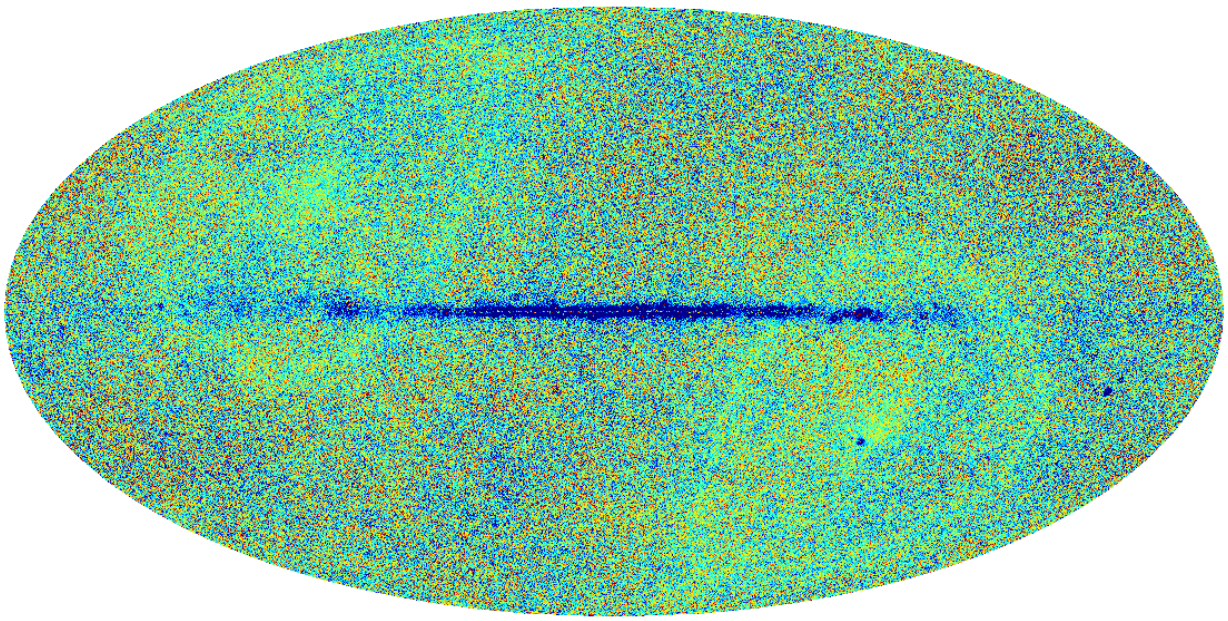


Figura 7. Vista del archivo `wmap_sim_forered_imap_r9_yr7_W4_v4.fits` en la proyección Mollweide 2D. Datos reales del WMAP

Referencias

[1] S. Weinberg. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the Genaral theory of Relativity.* John Wiley and Sons, 1972.

[2] S. Dodelson. *Modern Cosmology.* Academic Press, 2003.

[3] M. Zaldarriaga et.al. Microwave Background Constraints on Cosmological Parameters. *Ap. J.* **488** (1997):1-13.

[4] S. Perlmutter et. al. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *Ap. J.* **517** (1999):565-586.

[5] E. Komatsu et.al. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation. *Ap. J. S.* **180** (2009):330-376.

[6] U. Seljak and M. Zaladarriaga. A Line of Sight Approach to Cosmic Microwave Background Anisotropies. *Ap. J.* **469** (1997):437-444.

[7] U. Seljak and M. Zaladarriaga. CMBFAST for Spatially Closed Universes. *Ap. J.S.* **129** (2000):431.

[8] R. Durrer. *The Cosmic Microwave Background.* Cambridge University Press, 2008.

■